

ソーシャルデジタルツインの設計原理

—ABM を用いた実世界への介入・構築マネジメントの基本アーキテクチャー

○出口弘 (千葉商科大学)

Design Principle of Social Digital Twin as Intervention Management via ABM

* Hiroshi Deguchi (Chiba University of Commerce)

概要— 本稿では、自律的エージェントとその相互作用に関する、エージェントベースモデリング (ABM) を、対象の人間活動システムに対するマイクロモデルとした上で、対象の人間活動システムに目的に応じて介入するための、介入マネジメントのための基本枠組みを論じる。本稿ではまず ABM を用いた、何らかの目的に基づく人間活動システムへの政策的な介入が、広義の制御サイクルであり、そこでは ABM に基づいたミクロな内部モデル上で、介入シナリオが事前評価され、その上でシナリオ選択の合意形成、実行管理、結果の評価、評価に基づく制御のフィードバックが行われるプロセスを論じる。さらにそこで用いられる ABM の構築法についても事例をベースに論じる。

キーワード: ABM, Social Digital Twin, 介入マネジメント, ミクロマクロリンク, 合意形成

1 人間活動システムに関する介入のモデル化

本稿では、何らかの目的に従って現実世界に対して、介入あるいは機能構築するためのシステム分析とマネジメントの方法論と、設計論について論じる。そもそもエンジニアリングは現実世界に対する機能設計を行う。しかし伝統的なエンジニアリングが対象とする典型的なシステムは、橋梁やビルのような、いわゆるハードシステムであり、その対象に人間活動は含まれない。ハードシステムは人間が活動する基盤となるシステムとなるがその基盤は物理的事象である。それゆえハードシステム設計では人間がそれを用いるときのインターフェイスや機能要件に主体の目的が関与するが、対象となるシステムのメカニズムそのものに人間の活動は含まれない。他方で人間活動そのものを対象としたシステムは、人間活動システム(Human Activity System)あるいはソフトシステムと呼ばれてきた。このソフトシステムに対する方法論は、古くからさまざまに議論されてきた。ここでは主体を含むシステム固有の課題である、目的の措定や、討議空間の構築、合意形成(Consensus Building: CB)などが論じられてきた。これらは例えばチェックランド(P.Checkland)に始まるソフトシステム方法論や、環境アセスメントや、社会インパクト分析、EBPM(Evidence Based Policy Making)

など様々な領域で論じられてきた。また合理的意思決定モデルを基盤とするとは言え、経済学のマイクロモデルや、あるいはマクロ計量モデルを基盤とした計量経済モデルもまた主体を含むシステムを論じてきたと言える。

だがこれらのシステム分析や機能設計の中核にある主体を含む人間活動システムのモデル化については、必ずしもそのメカニズムモデルの構築に対しては十分な理解や分析に基づいたモデル化の方法や技術についての進展はない。マクロな現象論的方程式のレベルで集合変数に対する計量モデルは構築できても、より詳細な現実の境界条件や介入条件に対応する主体(エージェント)レベルでの動的なモデルについては設計・構築の原理は確立していない。

このような状況の中、様々な領域でDXが言われることで、組織から都市に至る広範な人間活動システムに対して、そのデジタルな複製とも言えるモデル(ソーシャルデジタルツイン)を構築し、それにより現実社会の課題解決を行おうというコンセプトが提唱され急速に注目を集めている。ただしデジタルツイン概念は本来、物理的オブジェクトを反映するように設計された仮想モデルを意味しており、一種の内部モデルに基づくフィードフォワード制御のための基盤技術とし

て捉えられる。「デジタルツインに関する国内外の研究 開 発 動 向 」 CRDS-FY2021-RR-09 <<https://www.jst.go.jp/crds/pdf/2021/RR/CRDS-FY2021-RR-09.pdf> 20230217 Access> では、デジタルツインを「高度な計測・観測により収集されたデータを基に、大規模データ処理と現象のモデリングを通じて、フィジカル空間内の現象や人工物をサイバー空間内で仮想的に再現・複製するシミュレーション技術」として定義し、製造分野、エネルギー・都市分野、気象・気候分野などを区別してその動向を分析し、その上でデジタルツイン構築・活用のフェーズを「①（デジタルツイン構築に向けた）デジタル化、②局所的デジタルツイン、③包括的デジタルツイン、④自律的デジタルツインの4段階」に整理区分している。しかしここで記されているデジタルツインに対するサーベイランスと整理区分はハードシステムを中心とした従来の工学観に縛られている。

このデジタルツイン概念が今日工場や都市など、そこに人間活動システムが含まれる対象に対しても、「ソーシャルデジタルツイン」という名称で、仮想空間上でこれをモデル化して、社会の課題解決に役立てようとするコンセプトへと変化している。例えば富士通とカーネギーメロン大学は、社会的課題解決のためのソーシャルデジタルツインの共同研究を開始している <<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2022/02/8.html> 20230217 Access>。

しかしながら、現時点でのソーシャルデジタルツイン概念は、人間活動システムを組織や個人などの自律的エージェントとしての主体単位でモデル化するためには、極めてナイーブな水準にあると言わざるを得ない。また人間活動システムに関する主体単位のマイクロモデルを含み、何らかの目的に従って現実世界に対して、介入あるいは機能構築するためのシステム分析とマネジメントの方法論・設計論についても理解が十分とは言えない。

本稿では、これらの課題について、二つの角度からアプローチする。一つは、人間活動システムに対して、機能要件（目的）に基づいた介入や機能・構造の構築を行うための、システム分析とマネジメントの方法論・設計論について、人間活動システムに介入して

目的達成をするための一連のシステム分析と介入プロセスのマネジメントの実サイクルを明確にすることである。目的的人間活動システムへの介入プロセスを、一回きりのプロセスとしてではなく、結果を評価してさらに改良進化させていく循環的プロセスとして扱うという考え方は、マネジメントにおけるPDCAサイクルなど、今日一部のマネジメント領域では広く受け入れられている。他方で、それを広く人間活動システムに対しての目的に基づく介入プロセスに適用している例は、前述のチェックランドに始まるソフトシステム方法論などごく一部である。

他方で、同様の循環的な改善進化の循環プロセスとして、対象に対するメカニズムモデルの構築そのものを循環的なプロセスとして説明するモデリングサイクルの概念は、比較的古くから科学教育や科学方法論に関する実用的な概念として扱われてきた。この科学方法論で用いられるモデリングサイクルは、数理的に表現された自然科学の対象に対するモデルについてその科学的な検証或いは反証を行うことで、モデルの真偽を示し、検証が不十分或いは反証されたモデルについて、さらなる修正を加えるというプロセスからなる。

それゆえモデリングサイクルでは真偽のコードで語られる科学的な検証と反証が課題となる。目的に従って現実介入する、或いはその介入が目的と照らして有効かという有効性のコードや介入のプロセスが法規範や資源制約などの実行状の諸制約条件から見て妥当かという妥当性のコードでの評価に関するマネジメントサイクルとはその評価のコードが異なるのである。これに対して科学的モデルに関するモデリングサイクルは、真なるモデル（偽ではないモデル）を求めたことを唯一の目的としている。

しかし、現実世界への介入に関して目的有効性の評価を基軸とするマネジメントサイクルは、エンジニアリングの領域でさえしばしば真偽の評価を基軸とするモデリングサイクルと誤解或いは混同される。これは後述するように、介入の有効性に関するマネジメントサイクルの一部に、対象のメカニズムに関するモデルが含まれており、例え対象が人間活動システムに対するメカニズムのモデル化であり、物理的・自然科学的なモデルでない場合にも、それが真偽のコードで語

られる自然科学的なモデルと混同されるからである。ここでは二重の混同がある。一つは目的に従って介入するプロセスを対象としたマネジメントサイクルと、自然科学の法則を対象としたモデリングサイクルの間の混同である。第二の混同は、マネジメントサイクルの中で用いられる、人間活動システムに関するメカニズムモデルと、自然科学での物理的普遍法則に基づいたモデルとの混同である。本稿では、この混同を解きほぐす一方で、目的に従った介入プロセスに関するマネジメントサイクルの概念を明確にし、そこで用いられる人間活動システムのモデル概念についてそれがどのように自然科学の普遍法則と異なるものかについて明らかにする。さらに人間活動システムに対するメカニズムモデルを、エージェントを基本単位として構築するという意味でのマイクロモデリング（エージェントベースモデリング:ABM）について、モデルの設計・構築法、モデルの動的なプロセス解析法、モデルを用いた介入シナリオの生成と事前評価などを、マネジメントサイクルの中で位置づけ明らかにする。

そこでまず、人間活動システムとしての現実社会への目的に基づく介入に関するモデリングサイクルについてその全体像を論じる。その上でモデリングサイクルの中核にある、人間活動システムのエージェント水準での動的なマイクロモデリングについて論じる。エージェント水準での人間活動システムのメカニズムの分析とモデル化は、エージェントベースモデリングと呼ばれる領域として発展しつつある領域である。今日のエージェントベースモデリングの基盤となる「Complexity of Cooperation」を国際政治学者のR.アクセルロッド(Robert Axelrod)が刊行してから今日まで、およそ30年が経過した¹⁾。アクセルロッドが提唱した当時のエージェントベースモデリングの方法論は、従来の合理的意思決定モデルや推計モデルなどの社会科学の数理モデルではうまく表現できない複雑な現象を、既存のモデルよりは複雑ではあるが、エージェントベースのモデルとしては、可能な限り単純なエージェント間の相互作用によってモデル化し、それをシミュレーションによって分析しようとするものである。これをR.アクセルロッドは、KISS原理(Keep It Simple and Stupid)と呼び、エージェントベースモデリングの

基本となる設計原理のひとつとした。しかしその後エージェントベースモデリング及びそのシミュレーションの技術の発展は、エージェントベースモデリングがより現実世界の複雑性を直接扱う方向へと変化することが求められてきている。しかしこの現実世界の複雑性をどのように扱うかに関しては決して合意はない。一方で既存の統計モデルとシミュレーションモデルとマクロモデルを補完的に扱うことで社会科学のモデルをより詳細に構築しようとする方向性がある。他方で、現実に近い作り込まれた詳細なモデルを構築するというファクシミリモデルという提案もある¹³⁾。しかしこれらのアプローチでは、我々が求めるエージェントベースのモデルの設計方法としてはあまりに曖昧でかつ社会科学のモデル構築法として不十分である。本稿では、エージェントベースモデリングを、目的に応じた人間活動システムへの介入のマネジメントプロセス（サイクル）

ABMが介入の認識関心に応じてサブモデルを設定とその粒度を決定しその合成モデルとしてマルチエージェントモデルを構築すること（マルチアスペクトモデリング）、エージェントや場（スポット）の属性をアグリゲートすることで集合変数を構築する或いは既にある集合変数のマクロ関係式をマイクロなエージェントの関係式に還元すること（マイクロマクロリンクとそのためのFoldingとUnfolding）、エージェントの動的な変化はティック単位の離散時間システムであり、エージェント間の相互作用はシーケンス図で示される様な、単一のスタック上にイベントを整列順序で並べる因果関係の記述方法ではなく、1ティックの中を、エージェントの実行順序を変えても結果が変化しないエージェントのイベントを並列に並べたタイムスライス（以下ステージ）に分けて、ステージ間を因果的な順序で整列させる相互作用の因果モデルを用いること（ステージモデル）、エージェントや場の変化や相互作用を、どこのステージで実行するかという情報を付加したIf Thenルールとしての役割によって表現し、役割間に階層関係を持たせ、さらに役割の切り替えを可能とすること（役割モデル）、エージェントベースは、目的に応じた人間活動システムへの介入のシナリオをその中で記述し、そのシナリオの事前評価ができるこ

と（マルチシナリオシミュレーション）、エージェントベースシミュレーションに人間がプレーヤーエージェントとして参加することで問題への理解を深めることができ、合意形成のための討議空間を構築できること（ゲーミングシミュレーション）、人間活動システムのメカニズムモデルとしてのエージェントベースシミュレーションは、化学的な普遍法則に基づくものではなく、パラメータの推定を既存のスタイライズドファクトからの最尤推定で行い、かつエージェントの特性などモデルのさまざまな構造パラメータは常に変化することを前提とし、モデルの再同定を行う（非定常システム）などの特徴を持ったエージェントベースモデリングの設計法を論じる。またこの設計法の詳細例を感染制御のためのエージェントベースシミュレーションの事例を中心に、実際にエージェントベースシミュレーションを手掛けてきた領域のモデルを用いて示す。

2 目的に基づく介入のマネジメントサイクル

本節では、目的（機能要件）に基づいた現実世界への介入あるいは構築のためのマネジメントサイクルについて詳細を述べる。エージェントベースのモデルは、この介入プロセスのマネジメントサイクルの中で、中核となるエージェント水準でのメカニズムモデルとなる。だがメカニズムモデルの真偽で目的に基づいた介入の有効性が決まるわけではない。なによりも、現実社会への機能要件（目的）に基づいた介入や構築のプロセスでは、介入プロセスが陽な形でモデルに取り入れられる必要がある。換言すると、人間活動システムに対する目的とそれをブレークダウンした機能要件に基づいた介入制御（あるいは機能構築）のモデルが求められる。ここで機能要件を満たすように現実の人間活動システムに介入する制御モデルと、機能要件を満たすように新たな人間活動システムの構築を行う構築モデルは、本質的にはその設計と実装は同型となるが、ここではより簡単でかつ応用範囲の広い、介入に関する制御モデルを中心に扱う。ハードシステムに対する古典的なフィードバック制御では、線形システムの場合一定の条件の下で可制御＝可観測がなりたつ。だが人間活動システムは基本人が役割にもとづき活動する極めて非線形性の高いシステムである。従って、可制

御＝可観測が直ちに成り立つとは言えない。しかし他方で状態変数とその観測抜きでは制御はそもそも不可能である。どのような状態概念とどのような制御入力概念、どのような観測概念が可能となるかを問うことがソフトシステムに関する制御問題では重要となる。さらにハードシステムに関するフィードバック制御では、リアプノフ安定性や漸近安定性が課題となる。また時間応答性も課題となる。これがソフトシステムに対する、目的充足のための介入という広義の制御では、ハードシステムに関する制御概念と同じ数学的な枠組みはルールベースのダイナミクスである以上使えない。他方でシステムの定常性や非定常性、状態空間と状態遷移など基本的な動的システムに関する枠組みは共通で用いることができる。本稿では、既存のハードシステムに対する制御概念を援用しつつ、主体を含むシステムに関する、目的達成＝制約充足のための介入プロセスに関する一連のマネジメントサイクルを制御のフィードバックサイクルとして捉え、そこでのソフトシステム固有の課題をまず明らかにする。現実の課題解決のための介入のプロセスがソフトシステムに対する一種のフィードバックサイクルをなすことについては、ソフトシステム方法論などでも既に議論されてきた。しかしここでは、中核にエージェントベースのメカニズムモデルは必ずしも指定されていない。個人や組織を自律的活動主体とした人間活動システムのマイクロなメカニズムをモデル化することで、現実社会の介入水準にあった介入シナリオをエージェントベースのモデルの中で検討することが可能となる。これは、実世界の人間活動システムに対する介入シナリオを検討する上で決定的に重要な視点となる。なぜなら何らかの目的に基づいた人間活動システムへの介入施策は、マイクロなエージェントベースのモデルの上でその介入が明示的に表現できる場合が大部分だからである。無論たとえば金融の利子率のようにマクロなパラメータの決定がそのまま介入施策のパラメータとなる場合もあるが、多くの介入施策では、その施策を認識し実行する水準でのマイクロなエージェントベースモデリングが原理的に必要となる。そのモデルに基づいて介入シナリオを評価し、そのシナリオ選択に対する合意形成を行い、選ばれたシナリオの実行管理を行い、結果を目的に照

らして評価する。このプロセスは、一種の循環制御プロセスであり、しかもその内部にエージェントベースモデリングに基づく内部モデルを持ち、介入シナリオの事前評価を行う。この介入制御のマネジメントサイクルは、Fig.1のように示され、次のようなステップに詳細化される。

対象に対する①「認識や解釈」「意図」に基づき達成すべき「目的」を立てる。目的はブレークダウンされ何らかの制約充足問題へと展開される。②この目的を実現するための「介入手段」を現実の人間活動システムに対する認識水準で定義することのできる水準でのエージェント単位のメカニズムモデルを構築する。現実の介入手段の認識水準に合わせた水準で、エージェントの内部状態変数やコホート変数を必要な粒度で定義する。さらにエージェントの活動のベースとなる都市やそこでのエージェントの行動、エージェント間の相互作用なども必要な粒度のモデルとして構築する。これらはエージェントの相互作用モデルに対する付加条件となる。③構築したエージェントベースのモデルを用いて、様々な介入シナリオを想定して介入シナリオの事前評価を行い、この事前評価に基づきステークホルダーに介入の為の代替シナリオを複数提示する。これはエージェントベースモデルを内部モデルとしたフィードフォワード制御に対応する。④さらに実行可能性や資源動員など様々な意思決定原理や異なる立場・視点から介入シナリオを検討し、介入シナリオの選択とそのステークホルダー間での「合意形成(CB: Consensus Building)」を行う。⑤選択された介入シナリオに資源を割り当て、介入プロセスを実行しその実行管理を行う。⑥介入の結果を観察しその有効性を介入目的に基づいて評価するまた同時に介入プロセスの妥当性を監査する。⑦その評価と監査の結果に基づき、①～⑥に関する捉え直しを、目的の再設定、モデルの再構築、代替案シナリオの再評価、合意形成の再構築、実行管理プロセスの再構築、結果の再評価など形で行う、循環的なマルチモーダルのフィードバック学習を行う。

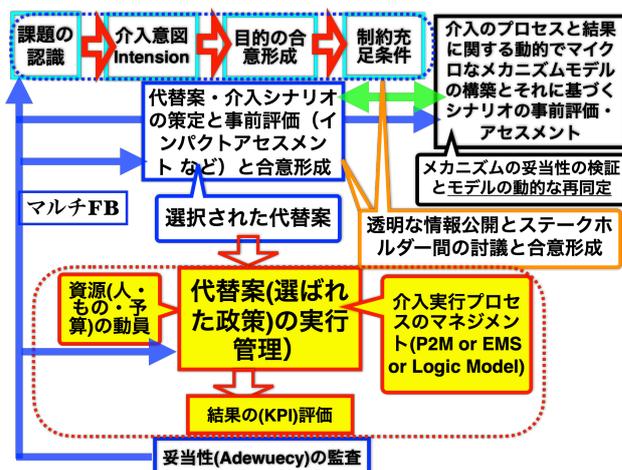


Fig. 1 介入マネジメントのマルチモーダルの学習フィードバックループ

3 エージェントベースのマイクロモデル設計原理

本節では、エージェントベースモデリングの基盤となる、エージェント水準でのマイクロモデルの設計原理について述べる。本稿ではエージェントベースモデリングを、動的システムのモデリングの一種として扱う。動的システムのモデリングでは、状態変数と状態遷移の動的メカニズムを構築することが基盤となる。

このモデル構築過程で、しばしばマクロな集合量としての状態変数を用いた、マクロ現象論的モデルと、その現象論的方程式が還元されるマイクロな基礎方程式の関係が問題となる。主体を含むシステムに関するモデル化は、社会学や経済学、あるいは公衆衛生学などの諸領域で何らかのマクロな集計量に対する計測とモデル化が中心になされてきた。

そのマクロモデルは、個々のエージェントの属性(状態)に対して、特定の状態を持つエージェントの人口(あるいは人口比率)がマクロ状態変数として用いられ、その変化の動学を扱う人口動学モデルが用いられることが多い。感染症疫学の SIR モデル、進化経済学のレプリケータダイナミクス、生態系のロトカ・ヴォルテラモデルなど多くのマクロの現象論的方程式が人口動学モデルの形を取る。

この人口動学モデルを、マイクロな基礎づけなしに、直接定式化し、そこで用いられるパラメータを、マクロデータから推計するのがマクロ人口動学モデルの典型

的な構築技法となっている。例えば、感染症疫学の SIR モデルでは人口を N として、三つの状態変数 S, I, R 間のダイナミクスを扱う。 S は未感染者の人口、 I は感染者の人口、 R は死者あるいは回復して免疫を持っている人間の人口とする。その上で、 $S(t)+I(t)+R(t)=N$ (総人口) の条件で動学的な変化を記述する。これに対して、マイクロなエージェントベースのモデリングでは、マイクロなエージェントや場の状態変数決定し、その状態変数の動学を定式化する必要がある。

ただしエージェントベースモデリングは、常に対応するマクロな動学モデルが存在するわけではない。一般に、マイクロなエージェントの状態変数の定義とそこでの動学の定式化から出発する数多くのエージェントベースのモデルが構築可能であり、今後構築が求められている。しかしその構築をアドホックなシミュレーションの技法としたのでは、社会経済組織に関する様々な介入マネジメントに関する、共通のモデリングの方法論や、その為のシミュレーションのライブラリなどを構築することは難しい。

本稿では SOARS を用いたエージェントベースモデリングのシミュレーションを念頭に置きつつ、その前段階としてより一般的なエージェントに対する何らかの介入を含むマイクロモデリングの方法論を論じる。

一般に、マクロな現象論的方程式とマイクロなモデルの間には、マクロはマイクロに還元されるという関係がある。これが統計力学の場合には、マイクロな法則は物理学的な基礎方程式になり、一度法則が検証され確立されれば、法則事態が変化することは想定しなくてよい。その上で特定の課題に対して固有の条件があればそれを制約条件（境界条件）として付加したモデルを構築する。 Fig. 2 で Γ をベースとなるマイクロな法則（例えば統計力学の法則や電磁気学の法則）とすると、それに特定の条件（例えば電磁気学で定常電流界）を付け加えたモデルを Γ' で表す。この Γ' のマイクロな状態変数から何らかの集合量（積分量）をマクロ変数として定義したモデルが Fig. 2 の $\Gamma'ex$ であり、そこではオブザーバブルとしてのマクロ変数が定義され、それがしばしば実験的な観察量となる。これに対して、最初からマクロな変数の間の関係を定式化したモデルは、

他方で、物理学であってもマクロな現象論的方程式は、マイクロな物理学的法則を表す方程式に特殊な境界条件を付加した上で、マイクロな状態変数からマクロな状態変数を構成する

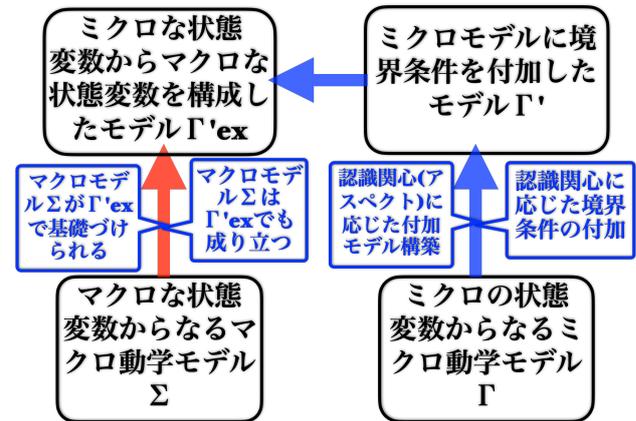


Fig. 2 マクロモデルのマイクロモデルでの基礎付け図式

マイクロなエージェントベースの動的モデルは、比較的単純な条件下では、エージェントのある状態の人口をマクロ変数としたマクロストックフローモデルと関係付けることができる。これによりマイクロな動的プロセスを、きちんと定式化し、例えば力学系の分岐理論等の理論枠組みを援用することができる。しかし他方で従来知られている力学系の理念型としてのモデルは、集中定数系（常微分方程式）、分布定数系（偏微分方程式）、格子力学系、回路網力学系など限られたものでしかない。それはより詳細な境界条件を持つマイクロプロセスを近似するには限界がある。

物理学的なマクロな現象論的モデルがそれを基礎付ける物理的なマイクロモデルへと還元される際には、 N 個の気体からなる統計力学的なモデルに対する $6N$ 次元の位置と運動量のマイクロ状態変数とそこでの動的プロセスが、また電磁気学の領域では、マクロな回路の機能やオーム法則に対して、マイクロな場の法則としてのマックスウェル方程式などが対応している。ここまでは、物理的なマイクロ状態記述とその動的変化についての法則は、 Universal Law（普遍法則）であり、ニュートン力学と量子力学のように適用範囲により拡張されることはあるが、法則そのものの一定範囲内での妥当性は揺るがない。これに対して、我々が課題としているエージェントベースのモデリングをマイクロなメカ

ニズムモデルとした現実世界への介入マネジメントのサイクルでは、そもそも物理的なマイクロモデルのような普遍法則を扱っているわけではない。マクロな現象として観察される諸変数を還元すべきマイクロなメカニズムはあくまで個人、家計、組織などの意思決定主体としての自律的エージェントを要素としたマルチエージェントシステムである。そこでは固定した普遍法則はそもそも存在しない。その時代・文化・制度の中で限定された動的な変化や相互作用そのものも、その時代に構築された技術・社会・制度的な境界条件により実現されるものである。千年前の世界でも、一千年後の世界でも若干の修正はあっても天文学は通用するが、経済学は通用しない。少なくとも一千年前の世界で、金利や国債やマネーフローについて論じることは意味がない。前提となる制度や社会文化が構築されていないからである。それどころか僅か数十年前、インターネット以前の世界で、SNSなどのパーソナルメディアやプラットフォームのロックインについて論じても荒唐無稽とされたであろう。エージェントベースモデリングによる現実への介入のマネジメントは、当該の時代の文化社会制度的な境界条件を前提とし、さらに学習やその他の条件によってエージェントの行動が変化する非定常のシステムと見做せる。このような非定常のシステムを普遍的な法則と同様に扱うことはできない。ハードシステムの場合には、橋梁の設計のように、目的を機能要件にブレークダウンした後に、基礎となる物理法則（剛体力学）に、制約受速条件を満たすように橋梁構造に関する適切な境界条件を加えることが課題となる。これに対しソフトシステムに対する機能要件を満たすように介入する介入マネジメント（制御）問題では、マイクロプロセスの中で、介入制御ポイント（複数）に対する介入シナリオを定めた上で、介入した効果に関する事前評価を行う。

エージェントベースの動的システムを、一方で限定した条件下で既存のストックフローの力学系と結びつけると同時に、そこからより詳細な構造化を行い、エージェントがルール（役割）ベースで活動し、相互作用する非線形の確率的な動的システムとして、モデルの定式化の頑健性を保ちつつ、それをシミュレーション

で解くというのがエージェントベースモデリングの手法となる。

【マイクロモデリングの事例】

ここでは感染症疫学の SIR モデルを事例として、感染制御の枠組みに対するマイクロなエージェントベースのモデルの構築と、マイクロ（エージェントベース）モデルとマクロモデルとの関係について説明する。SIR モデルでは三つのマクロ変数 S,I,R の関係を下記のような現象論的方程式として定式化している。

S(t):未感染者, I(t):感染者, R(t):除去者, N:総人口

$$\bullet \quad dS(t)/dt = -\beta \times S(t) \times I(t) \quad (3-1)$$

$$\bullet \quad dI(t)/dt = \beta \times S(t) \times I(t) - \delta \times I(t) \quad (3-2)$$

$$\bullet \quad dR(t)/dt = \delta \times I(t) \quad (3-3)$$

この SIR モデルは感染症に関する現象論的なマクロ微分方程式であり集中定数系になる。このマクロ方程式を基礎付けるマイクロのエージェントベースモデルをまず与える。ここで極めて重要なことは、SIR モデルは、エージェントレベルでは、エージェントがランダムマッチング相互作用をしている極めて特殊なケースをマクロ化したモデルとなっているという点である。これを示す為、マイクロのモデルを構築する。

ω を個々のエージェント、 Ω はエージェントの全体集合とする。 $|\Omega| = N$ (全人口)

State: $\Omega \rightarrow \{s, i, r\}$ 個々のエージェントにその疾病状態(未感染 s, 感染 i, 死亡 or 回復 r)を示す状態関数。

$$S(t) = |\Omega [s;t]| = |\{\omega \mid \omega \in \Omega \ \& \ \text{State}(\omega) = s\}| \quad (3-4)$$

$$I(t) = |\Omega [i;t]| = |\{\omega \mid \omega \in \Omega \ \& \ \text{State}(\omega) = i\}| \quad (3-5)$$

$$R(t) = |\Omega [r;t]| = |\{\omega \mid \omega \in \Omega \ \& \ \text{State}(\omega) = r\}| \quad (3-6)$$

と S,I,R のマクロ変数をそれぞれ対応するマイクロな属性, s,i,r を持つエージェントの数から定義する。

その上でエージェントの状態変化の動学を $P[s,i;t](\omega)$ という個々のエージェントの状態遷移確率によって表現する。このとき、 $P[s,i;t](\omega)$ が、

$$P[s,i;t](\omega) = \beta \times I(t) \quad (3-7)$$

$$P[i,r;t](\omega) = \delta \quad (3-8)$$

であれば,

$$\Delta I(t) = \Sigma \{ P[s_i;t](\omega) \mid \omega \in \Omega [s_i;t] \} - \Sigma \{ P[r_i;t](\omega) \mid \omega \in \Omega [r_i;t] \} = S(t) \times \beta \times I(t) - I(t) \times \delta$$

$\Delta I(t) = S(t) \times \beta \times I(t) - \delta \times I(t)$ となり SIR と同じ力学系, $dI(t)/dt = \beta \times S(t) \times I(t) - \delta \times I(t)$ が導かれる. ここで β は感染率, δ は除去率と見なされる.

このとき, ミクロなダイナミクスを定める式(3-7)が成り立つのは, エージェントの相互作用という視点からは, 感染しているエージェントと未感染のエージェントがランダムに相互作用しているときとなる. すなわちこのモデルには, 特定の場での相互作用や, 都市構造, そこでの人間の活動モデルなどの詳細構造は境界条件として組み入れられていない. これは Fig. 3 で示される.

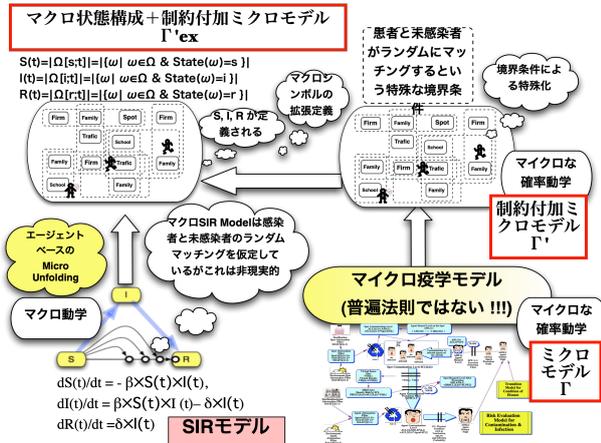


Fig. 3 SIR モデルをミクロに基礎付ける

これに対して, 感染に対する介入施策などのさまざまな相互作用に関する介入項を導入する, 或いは相互作用の場を一律な空間ではなく, 人々が社会的活動を行う都市の構造を導入し, 都市空間のさまざまな局所的な場での感染やそこでの感染対策をモデル化することができる. このような複合的な境界条件を導入したメカニズムモデルは, Fig. 4 に示されるように, マクロ SIR モデルに還元できない. マクロモデルをマイクロに展開(Unfolding)したモデルは, Fig. 5 のような様々なアспектからの構造を境界条件として付加したサブモデルの合成システムとして把握できる. そこでもマクロな状態は, (3-4)~(3-6)のように定義できるが, その変化は, SIR モデルのダイナミクスとは異なるものと

なる.

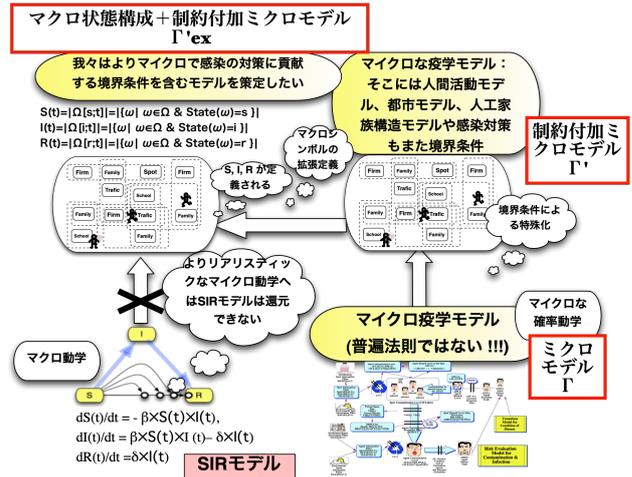


Fig. 4 SIR モデルでは扱えない複合的境界条件

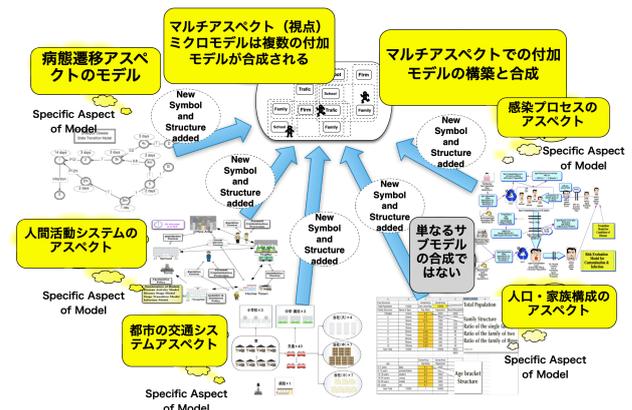
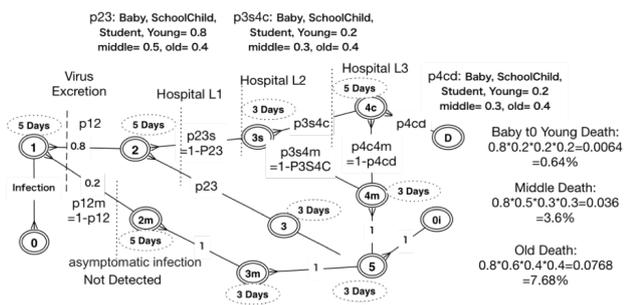


Fig. 5 マルチアспектのサブモデルの付加

4 状態空間の構成と状態遷移

マルチエージェントのモデリングでは, エージェントに固有の状態変数の定式化が必要となる. さらにそれは対象領域に関する認識関心によりその粒度が異なる. 感染制御のためのマイクロモデルの事例では, マクロ SIR モデルの, 式(3-1)がエージェント間の相互作用の結果感染者が増える(非感染者が減る)メカニズムを表し, 式(3-3)が病態遷移の結果感染者が死亡または免疫がついて回復するプロセスを示している. しかし現実の公衆衛生対策を論じるためには, 世代別の重症化率や死亡率についての情報をモデルの中で表現することが必要となる. そのためには, 感染した後での病態の遷移について, より詳細な状態モデルとその遷移のプロセスモデルが必要となる. Fig. 6 は, 新型コロナ

ナに関する状態とその遷移のモデルで未感染0, 感染潜伏状態1, 発症2及び不顕性感染2mなど状態を区別し, その間の遷移確率と状態推移時間を示したものである. この確率は, さらに世代別に区分することで, より詳細なモデル化が可能となる. このような病態遷移モデルは, それ自体, 標準的な治療を前提として作成される. ここから遷移のパスに応じた標準治療のクリニカルパスの所要量の推計も可能となる. 実際の感染制御の過程で, 治療に必要なクリニカルパスを維持するための資源の飽和は, 病床の確保だけでなくクリニカルパスへの投入資源全般にわたり, その危機シナリオに応じた事前推計は大きな課題であるが, エージェントベースモデリングでは十分に認識されていない領域でもある.



Cover-19 Disease State Transition Model

Fig. 6 新型コロナウイルスの病態遷移モデル

5 エージェントの相互作用のモデリング

次に, エージェントの相互作用モデルの構築について, 感染制御のエージェントベースモデルを事例として説明する. マクロ SIR モデルでは, エージェントの相互作用によって感染が広がるプロセスは, 実質的に式(3-1)で示され, そこでは感染者と未感染者のランダムマッチング型の相互作用が仮定されていた.

実際の社会での感染の拡散過程は物理的な偏微分方程式や格子力学系の拡散過程とは異なりウィルスが大きく増殖する増殖過程(感染クラスター)と人々の間を連鎖的に感染が伝播しつつウィルスを保持し地理的に拡散する連鎖拡散過程が人の行動で媒介される極めて特殊な拡散過程である. この確率的拡散過程を抑制する制御メカニズムの設計では, この感染拡散過程の

特性を考慮すると同時に媒介する人のリスク選好に依拠した行動変容を理解する必要がある. ここでは感染対策としての介入を以下の4つの制御モードにおける介入制御手段として区分する.

- 制御モード1: 場での感染確率制御,
- 制御モード2: 行動制限, 制御モード
- 制御モード3: 発見隔離,
- 制御モード4: ワクチン接種

に区分して感染拡散過程を抑制するための制御を行うとする. その制御の有効性を論じる.

これらの介入制御を評価するためには, この介入をモデルに導入できる粒度のモデル化が必要となる. ここでは制御モードのうち, エージェントの場での感染確率を制御する施策を対象とした制御モード1を取り上げる.

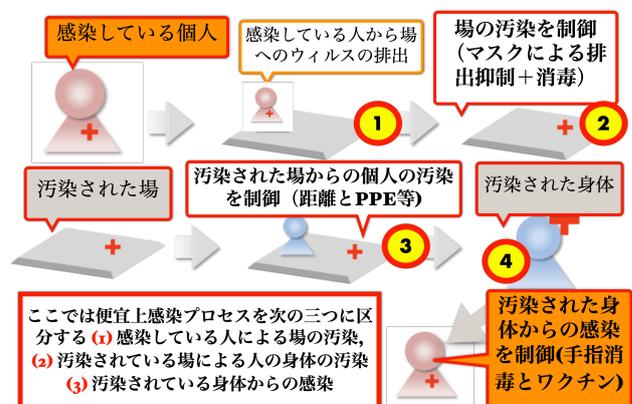


Fig. 7 場の感染確率を下げる制御メカニズム

感染プロセスのマイクロメカニズムを Fig. 7 のようにプロセスに分解すると, そこに介入するメカニズムのモデル化は, Fig. 8 のように行われる.

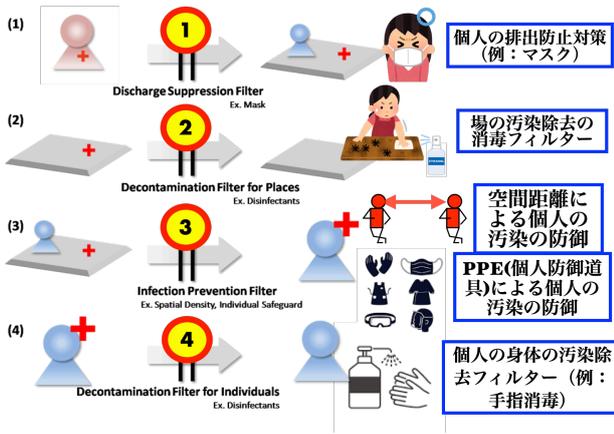


Fig. 8 フィルター型介入対策のマイクロモデリング

このフィルター型の感染対策の効果をパラメータとしてモデルに組み込むことになる。このマイクロな政策効果のパラメータは、スタイライズドファクトに基づき最尤推定することが求められる。例えば、季節性のインフルエンザの実効再生産数 (R) は、2～3であると考えられている。これは新型コロナよりかなり小さい。季節性のインフルエンザは、例年一定程度のワクチン接種下で、東京都で言うと定点あたり1週間の感染報告数の平均が50人を超える流行のピークを1～2月に迎えるのが例年のパターンである。注意報は、定点あたり週平均10人、警報は30人で出される。ところが2019～20年のシーズンでは新型コロナの流行が2020年の1月には早くも注目を集めその頃から手指消毒用のアルコールとマスクが品不足となった。その状況でインフルエンザは例年のようなピークに向かわずに流行は収束した。2020～21と2021～22のシーズンは世界的な感染対策の強化で、インフルエンザウィルスの国内への侵入がほとんどなく流行は起きなかった。ところが2022～23の今シーズンでは、インフルエンザのウィルスそのものは国内に入り流行は徐々に始まったが、結果として東京都では定点あたり週平均10名にぎりぎり届かずに流行は収束に向かっている[Fig. 9]。これを一つのスタイライズドファクトとして、感染制御における膜区と手指消毒のフィルター効果の推定に用いることができるだろう。

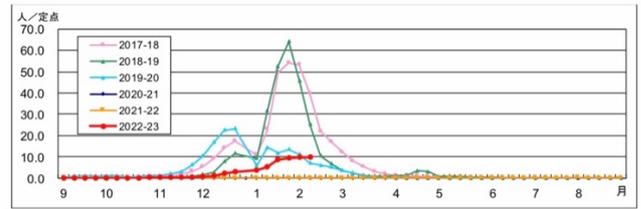


図1. 東京都内における定点あたり患者報告数の年別推移

Fig. 9 東京都の定点あたりの週平均のインフルエンザ患者数のシーズン比較

6 状態測定のグラウンディングのための社会統計

人間活動システムのマルチエージェントモデリングでは、エージェントや場の状態そのものの測定がそもそも問題となることが多い。だが感染症でさえ、感染者数の把握にはかなりの労力を要する。現在、社会のさまざまな状態の把握と分析は、公的組織による社会統計の構築に基づいている。日本では公的統計は現在統計法のもとでの企業や家計に対する個票ベースの調査である基幹統計調査と、その上の加工統計である基幹統計として作成されている

https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/1-1n.htm (20230217 Access). この公的な社会統計の構築の歴史はそれほど古いものではない。例えばGDPを計算するのに用いられる2008SNAは、その最初のストックを含む枠組みである68SNAが導入されたのは1968年であり、半世紀と少しの歴史しかない。むしろ統計法に依拠した社会統計は「行政利用だけではなく社会全体で利用される情報基盤」として位置付けられている

https://www.soumu.go.jp/toukei_toukatsu/index/seido/1-1n.htm (20230217 Access) .

指定統計である基幹統計調査以外にも、行政機関が行う基幹統計調査以外の統計調査の一般統計調査や業務統計調査がある。しかしこれらの公的統計調査は、政策の基礎となる加工統計を求めるための調査であり、エージェントベースのモデリングでの測定にグラウンディングすることは意図されていない。ソーシャルデジタルツインで求められるエージェントベースの人間活動システムの測定のための調査としては不十分であり、今後エージェントベースの社会モデリングをグラウンディングさせるための公的統計の整備が求められ

る。

一例として糖尿病の標準治療下での病態のステージの遷移の推計と、そこへの新たな治療介入の事前評価という問題を取り上げる^{8),19)}。ここでは、レセプトデータを「ABM 対応の基本統計調査」と見做し、レセプトデータから対象となる病態ステージ別の標準治療をDPCコード(診断群分類番号)に基づき抽出し、患者調査(基幹統計)のデータを按分することにより得られる加工統計データを「ABM 対応の加工統計」とする。このデータに基づいて標準治療下での糖尿病の各病態ステージ間の年単位での遷移確率を推計することができる。この推計は、感染症の病態遷移と比べると、時定数はいい。この推計からさらに地域ごとや人口動態や疾病の初期条件に基づいて、疾病の病態ステージ別の患者数がどのように変化するかを推計することができ、必要な標準医療の臨床パスの需要推計ができる。

既存の疾病統計でも、例えば高齢化の進展と共に求められる医療需要と病床の必要量の推計は、個別には厚生労働省により推計されている。

<https://www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-12404000-Hokenkyoku-Iryouka/0000167844.pdf> (p45,46 20230217 Access) 同様に診療科毎に必要な将来の医師数の推計なども行われている。

<https://www.mhlw.go.jp/content/10800000/000595014.pdf> (20230217 Access)

これらに対し、脳動脈瘤の発症確率を脳動脈瘤のサイズの遷移確率から求めるエージェントベースのアプローチも可能である⁴⁾。

しかし今後求められるのは、アドホックな推計ではなく、動的な疾病などの諸状態間での遷移の推計モデルと連動する形で、明示的に導出方法も開示された、加工統計の上位層としての推計であり、そのための社会統計の革新である。一般にさまざまな疾患に対して、動的に疾病のステージの遷移確率を毎年推計することができれば、患者の病態毎の人数の推計やそこで必要な医療資源の必要量の推計のみならず、新しい治療の導入や治療のR&Dが行われた場合の効果の推計など多様な利活用が可能となる。Fig. 10はこの標準的な治療の臨床パス(CP)下での一定期間での病態ステ

ージ間での遷移確率に関連し新たな療法や介入手段が用いられたとした場合に、介入に基づき遷移確率が変化する場合の模式図である⁸⁾。

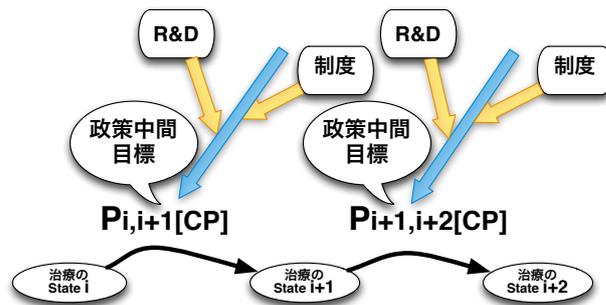


Fig. 10 標準治療下での病態遷移確率とそこへの介入

ここでは遷移確率部分に対しての介入により遷移確率が小さくなる率は専門家の What If 分析による想定シナリオにすぎない。しかしその想定シナリオであっても、どのような介入がどのような効果をもたらすかが動的なメカニズムモデルから推計できる。ここでの結果の要約は Fig. 11 で示される。ここでは現在の標準治療のままを含め5つのシナリオが比較できる¹⁹⁾。

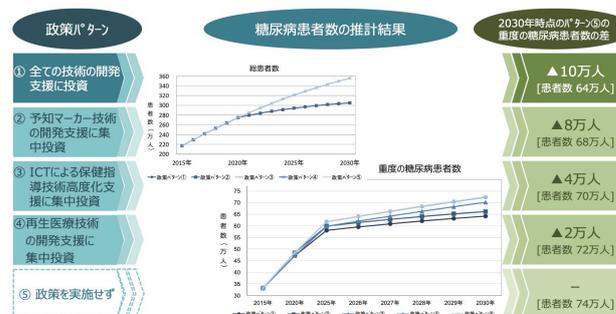


Fig. 11 各政策介入パターンによる患者数の推計

糖尿病の病態遷移プロセスでは、初期は自覚症状が少ないため、医療離脱という状態への遷移がかなり見られる。これをICTによる保健指導などにより何らかのサンクションで治療状態に戻すという介入施策を想定したものが Fig. 11 の③のシナリオである。このシナリオは治療や予防に関する医学的 R&D とは異なるが、QOLの低下を防ぐためにかなりの有効性を発揮することがモデルから推計できる。逆に再生医療による介入は、介入ポイントはインシュリン治療からCKD(慢性腎臓病)への遷移並びに透析状態への遷移の部分になり、既に標準余命の少ない患者が多く、政策的効果はそれほど大きくない。

ここでは病態ステージ間の遷移確率が動的プロセスのマイクロなメカニズムモデルとして導入され、そこへの介入政策が遷移確率を変化させるものとして評価されている。この「ABM 対応の基本統計調査」から「ABM 対応の加工統計」を経て、「ABM 対応の動的メカニズムの推計モデル」へ至る遷移確率モデルの構成とそこでの介入のモデルに基づく介入シナリオの事前評価は、標準治療下で病態のステージが区分できる全ての疾患に関して適用可能であり、「行政利用だけではなく社会全体で利用される情報基盤」としてふさわしい。しかし現在標準治療下での病態ステージの遷移確率の推計は、そもそも公的統計では行われてない。その理由の一つが、動的な変化の推計が、現在の社会統計の概念枠組みを定める統計法の範囲には存在しないからである。従来の社会統計でも、基幹統計調査から基幹統計という加工統計を構築する。しかしここでは加工統計の上に動的な状態遷移の推計モデルを一部の例外をのぞいては構築しない。唯一、動的なモデルの推計が現在の加工統計の上に公的推計として作られているのが、国立社会保障・人口問題研究所による人口・世帯数の将来推計である。
<https://www.ipss.go.jp/syoushika/tohkei/Mainmenu.asp>

(20230217 Access)

筆者は統計法改正時の統計委員会（以下竹内委員会）の十三人の委員の一人として、電子スキャンによる時定数の短い統計調査の必要性和、加工統計のさらに上位に、推計モデルを構築することの重要性を主張した⁵⁾。竹内委員会ではこうした研究の継続を約束したが、その約束は果たされなかった⁶⁾。

もし、国のレセプトデータを「ABM 対応の基本統計調査」として用い、そこから必要な加工統計を構成し、疾病ごとの病態ステージの遷移確率を推計し、それを毎年のレセプトデータから再同定することができれば、高齢化社会に必要な医療リソースについて多くの知見を得ることができる。

7 需要推計とその一般化

需要の推計は、何らかの産出されたサービス(使用価値: Value in Use)或いは商品(交換価値: Value in Exchange)を推計することになるが、そこでは同時にそ

の需要されるサービスや商品を産出する投入・産出のプロセスが存在する。これは需要の推計が同時に投入・産出プロセスを前提に、必要な投入に関する需要の推計が可能となる。そのためには財やサービスの投入産出のプロセスを財やサービス単位でマイクロなモデルとして構築する必要がある。

需要の推計、例えば医療需要の推計では、クリニカルパスの内部構造を明示することなく、単純なクリニカルパス名に対応したクリニカルパスへの投入を用いて、医療需要を推計することができる。さらに一般には、投入産出関係は複数のタスクからなるプロジェクト型の構造を取る。例えば生産に関する需要に対する原料と人的資本サービス、物的資本サービスの投入は、生産のプロジェクト構造から明らかにすることができる。財やサービスに対する全体としての投入産出関係を必要に応じて詳細なタスクからなるプロジェクトへと展開(Unfolding)することも需要の推計では必要となる。

需要推計は、人間活動システムに対するマイクロモデリングの広範な領域で重要な分析領域となる。ここでは直接対象となる需要と同時にそれを産出するために必要な投入が、投入産出関係から推計される。この投入産出関係を用いることで、必要に応じて投入側の推計も行うことができる。

例えば、家計は従来、購入した財を消費する主体として経済学的には捉えられてきた。しかし他方で、家計によるエネルギー需要や、そのガスや電気などの素性の分析には、単に静的な統計調査のモデルだけでは不十分で、実際に家計でどのような生活行動の維持に必要な活動が時間単位で行われており、そこでのサービス需要と、そのサービスの産出にどのような投入と、資本財（耐久消費財）が必要かというマイクロメカニズムをモデル化する必要がある。

エネルギーの投入量の推計を例にとって示す。

家計でのエネルギー需要は、家計でエネルギーを用いてさまざまなサービスを生産するサービス生産の投入産出プロセスを用いる活動（例えば冷蔵庫を使った冷蔵サービスの利用、エアコンを使ったエアコンサービスの利用等）を時間単位の活動としてまとめて、それぞれの活動に投入する電気エネルギーの総和をとつ

たものが、電気エネルギーの需要になる。このエネルギー需要の推計では、エネルギーの投入を要する活動とその活動を実行するための投入産出関係を知る必要がある。そのためには、時間単位での生活行動調査を基本となる一次統計として用いる必要がある。この目的に適合する調査は、NHK 放送文化研究所による国民生活時間調査 <<https://www.nhk.or.jp/bunken/yoron-jikan/>> (20230217Access)と、基幹統計調査である社会生活基本調査

<<https://www.stat.go.jp/data/shakai/2021/index.html>> (20230217Access)がある。我々の目的には、国民生活時間調査が向いており、この調査をもとに家計のタイプごとにどのような活動（サービス）が用いられているかを時間単位で推定することができる。例えば、食事時間は電子レンジなどを用いた調理サービス、炊飯器による炊飯サービスなどが求められ、夏であれば気温が上がるとエアコンサービスが必要とされるなどである。これは家計のタイプによりサービスの所要量が異なり、単身者であれば日中のエネルギーを投入するサービス利用は最小限となる。これらのデータにさらに当該地域の家計のタイプ毎の数を組み合わせることにより、その地域の電力需要を時間単位で推計することが可能となる¹⁷⁾。

生活行動に関する調査を基軸にした ABM の利活用は、多岐に渡る。生活行動から生活ゴミを排出する活動を区分し、ゴミの排出というアクティビティでの投入産出に廃棄物という産出を明示的に加えることで、家計単位の生活ゴミの排出のモデルを構築することもできる²³⁾。さらにエージェントの生活行動と呼吸量と活動地域での汚染物質の濃度から、生活行動と呼吸量を考慮した汚染物質暴露評価モデルを構築することもできる²⁵⁾。

ミクロな活動と活動に必要なサービスの需要、或いはそのサービスを産出するための投入の需要、さらに活動に伴う廃棄物などの産出、活動に伴う汚染物質の暴露など、さまざまな認識関心からの状態変化や需要量などの推計が可能となる。これは家計だけに止まらない。企業でのエネルギー需要に関しても同様の扱いが可能である。例えば、工場のワークに必要な投入として冷却サービスと電力サービスが必要なとき、電気

式冷凍機とガスタービン発電機の予熱を用いる吸収式冷凍機を設備として想定し、停電時の BCP（事業継続計画）や電力契約の条件などを加味した系統電力からの電力購入とガスタービン発電機のためのガス購入に関してのポートフォリオシナリオの分析などが可能となる¹⁰⁾。このような投入産出の連鎖から、需要量や投入量に関するシナリオを分析する際に、複数のプロセス或いは複数の企業にまたがるサプライチェーン上での投入産出の連鎖を分析することができる⁸⁾。地球温暖化ガスのサプライチェーン排出量は、スコープ 1、スコープ 2、スコープ 3 に分けて積算されるが、これらもそれぞれの企業の製造工程の投入産出からボトムアップに求めることがかのである。さらに、製造の上流から下流までのコモディティフローでの投入産出関係は、従来は産業連環表という形でアグリゲートされたものがマトリックスとして、5 年に 1 度推計されており、これは我々の視点からは、中程度の粒度での投入産出のメカニズムモデルの再同定と見做せる。これに対して、コモディティフローのネットワークそのものを、財やサービスの生産に関する投入産出の連鎖として把握し、さらに家計での消費という経済学の基本概念を、生活水準に応じた諸活動に対応する生活サービスの生産とその消費活動に必要な投入として捉えることも原理的に可能である。その上で企業の生産への人的資本サービスへの投入を家計からの労働投入として把握することで、企業のコモディティフローネットワークと家計が閉じた投入産出のネットワークとなり、そのネットワークのサステナビリティや成長についてマイクロにしかもリアルタイムに分析するという、リアルタイムエコノミーの研究プログラムも可能となる^{21), 12)}。

8 結語

本稿では、人間活動システムとしての組織や社会の諸システムに対するエージェントベースモデリングと呼ばれるマイクロモデリングの方法と、それを用いた実世界への介入のためのマネジメントサイクルについて論じた。従来エージェントベースモデリングやシミュレーションについては、その技術的側面についての議論が中心で、それが人間活動システムに対する介入

マネジメントの為の方法であり、ソフトシステム方法論や、環境アセスメントなど、実社会の中で様々に用いられてきたマネジメントサイクルとそこでの合意形成の議論との関連が課題とされることは多くはなかった。またマイクロモデルについては、その真偽、正しい予測が問題となり、介入の代替案としてのシナリオ生成やシナリオの事前比較についての議論は希薄であった。しかし既に本稿で論じたように、人間活動システムに対する介入は、役割行動に基づく強い非線形性と非定常性を持つ、自律的エージェントを基本単位としたソフトシステムに対する、間接制御であり、その制御サイクルそのものを明示化し、マネジメントすることにエージェントベースモデリングの本質がある。介入は必然的に新しい現実を構築し、その結果人間活動システム自体が非定常に変化する。これが既に指摘した人間活動システムのメカニズムモデルを再同定する必然性でもある。だがこれは目的に従った人間活動システムそのもののデザインと構築が介入の次のステップとして必然的に課題となるということでもある。既に人工物のデザインの世界では、仕様記述からシステムを構築するためのさまざまな設計論が、ソフトウェア領域のみならず広く工学的領域で論じられている。他方で、主体を含む社会システムに対しては、組織の設計や人間活動システムの設計について社会科学の領域で多くの議論と実践がなされてきた。この二つの設計論を統合する視座は、本稿で論じた人間活動システムに対する介入のマネジメントの延長上にあるが、本稿の範囲を超え別途論じるべき課題となる。

付録 エージェントシミュレーションの動的プロセスの制御と現実世界の動的プロセスの制御

本稿では、エージェントの相互作用のモデル化に関してマルチエージェントシミュレーションの実装処理系として SOARS を想定しているが、エージェントベースシミュレーションでは複数エージェントの因果的な振る舞いを構造化して記述する手法に関して多くのシミュレータでは課題を残している。その問題の核心には、エージェント間の因果モデルをどのように構築するかと言う課題がある。物理的な多粒子モデルでは、物理的時間の中で、粒子間の2体相互作用は、時間的

な前後関係が現実世界に存在する。粒子の物理的な相互関係モデルやそのシミュレーションでは、この物理的な因果律を前提とし、離散イベントモデルとしてその振る舞いを記述するのが基本となる。ここでは粒子エージェントの因果的実行順序は、因果的な実行順序に線形順序で一つのスタックに積むことができる。このようなマルチエージェントの実行に関する因果処理は、プロセス間の相互作用を表現するシーケンス図に基づき、実行順序の因果関係を整理することが基本となる。これに対して、実社会の複数のエージェント間の役割遂行プロセスでは、例えば伝票を集める締め切りがあり、その次にその集計作業があるとき、集められる伝票の到着順序は作業に影響しない。同様に数学のレポートと国語のレポートを収集し、その各々の平均点を求め、さらに全体の平均点を求めるという作業では、数学のレポートの収集はエージェントの提出順序には依存しない。これは国語のレポートも同様である。これをエージェント間の役割遂行の第一レベルの並列性とする。次に、数学のレポートが集まれば、次に数学のレポートの平均点の計算が可能となり、これも国語のレポートについても同様である。この数学のレポートの収集と平均点の計算と、国語のレポートの収集と平均点の計算は、作業として並列に実行可能となる。これを第二レベルの並列性とする。国語のレポートの平均点と数学のレポートの平均点の計算が終わっていれば最後に全体の平均点の計算が可能となる。このように社会的なエージェントのアクティビティでは、しばしばここで述べた、第一レベルの並列性と第二レベルの並列性が見出せる。実際の社会活動は、この第一レベルと第二レベルの並列性を利用して設計されていると言っても良い。しかしその因果的な並列性については、自覚的に設計原理として利用してはいない。社会シミュレーション言語 SOARS はこの第一レベルの並列性を可能とするエージェントベースモデリングを実現することを目的として設計実装された^{3), 24)}。

SOARS は、当初、Spot Oriented Agent Role Simulator と呼ばれ、エージェントの活動を役割(Role)として特徴づけ、その役割の取得、切替えを可能とした。さらにエージェント間の役割の実行順序に関して、離散の単位時間 (Tick)を複数のステージ(Stage)と呼ばれる因

果的に順序付けられたスライスに分割した。そこでは同じステージの中ではエージェントの役割の実行順序を入れ替えても結果が変化しないという条件を満たすことをステージの分割の条件とした。その上でエージェントの活動や相互作用を示す役割の実行をステージに紐付けることで、エージェントの実行順序の時間的因果性を並列性（ステージ内）と因果的順序（ステージ間）で分離した因果性のモデルを提供した。これはマルチエージェントシミュレーションの因果性に関して極めてユニークなフレームワークであり、現在でも SOARS だけがこのフレームワークを用いている。しかしながら、本稿で述べたエージェントベースシミュレーションは、SOARS のステージ概念やロール概念を継承したアーキテクチャを持つ言語であれば容易に実装できる。

現在 SOARS は、小野、市川を中心としてリファクタリングされ、その Stage や Role といった基本的な設計原理を継承しつつ、コンパイル可能で巨大モデルの構築可能なエージェントベースモデリングのためのシミュレーション言語として発展しつつある^{20), 14)}。SOARS の名称も、Stage Oriented Agent Role Simulator となった。さらに現実世界での IoT 機器の制御やさまざまなエージェントとの、デジタルツインとしてのやりとりをするならば、現実世界で重要となる第二レベルの並列性も第一レベルの並列性と共に用いて、現実世界のエージェントの役割遂行を制御するための新たなフレームワークが必要となる。これを我々は、リアルワールド OS と呼び、そのプロトタイプモデルを作成している⁹⁾。現時点で、デジタルツインの諸概念の中に、現実世界のマルチエージェントの協調分散制御のための制御枠組みの提案はほとんどない。膨大な現実世界のエージェントに対する制御プログラムとそのデバックを考えた時、ここでも新たな並列性の制御とそのバーチャルワールドとリアルワールドの連携枠組みが必須となるだろう。

謝辞

本研究の一部は科学研究費基盤 C 「21K12139」により助成を受けたものです。ここに謝意を表します。

参考文献

1) Axelrod, R., *The Complexity of Cooperation*. Princeton

University Press, 1997.

- 2) Deguchi, H., *Economics as an Agent Based Complex System*. Springer-Verlag, 2004.
- 3) 出口弘, 田沼英樹, 清水哲男, “エージェントベースの社会シミュレーション言語 SOARS の設計思想とその展開,” 第 35 回計測自動制御学会システム工学部会研究会, pp.153-158, 05 PG0002, 2005
- 4) 出口弘, P2M 思考にとってのエージェント&ゲーミングシミュレーション, 国際 P2M 学会記念論文集, 2005 年 1 巻 p. 22-31, <https://doi.org/10.20702/iappmjournfirstis-sue.KJ00005760805>
- 5) 統計システムの高度利活用に関する三つの提言 (出口委員, 榊委員提出資料, 2008 http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/singi/toukei/2008wg/wg4/wg4_11/siryou_3.pdf (20230217Access))
- 6) 出口 弘, 榊 俊吾, 大貫 裕二, 電子スキャニング統計の構想とそのアーキテクチャデザイン(持続可能な社会経済システムと地域総合デザイン), 社会・経済システム, 2010, 31 巻, p. 115-120
- 7) Hiroshi Deguchi, Tomoya Saito, Manabu Ichikawa, Hideki Tanuma, “SIMULATED TABLETOP EXERCISE FOR RISK MANAGEMENT - ANTI BIO-TERRORISM SCENARIO SIMULATED TABLETOP EXERCISE”, *Development in Business Simulation and Experimental Learning*, vol. 38, pp. 1-21, Mar. 2011
- 8) 出口弘, 研究のための方法論-社会システムの制度デザインの方法論: 政策科学の方法としてのエージェントベースモデリング&シミュレーション, 計測と制御, 2013, Vol.52, No.7, pp.574-581
- 9) 出口 弘, IOE 時代の P2M 支援環境としての実世界 OS, 国際 P2M 学会誌 2015, 9 巻 2 号 pp.99-122, DOI https://doi.org/10.20702/iappmjourn.9.2_99
- 10) 出口 弘, 竹林 知善, 吉田 宏章, 梅宮 茂良, 紺野 剛史, 石塚 康成, 木寺 重樹, 倉田 正, Chang Shuang, エネルギー会計によるエネルギー運用計画デザイン, 国際 P2M 学会誌, 10 巻, 1 号, p. 191-214, 2017
- 11) 出口弘, 交換代数を用いた実物複式状態に基づくシステム記述とその利活用, 第 27 回社会システム部会研究会(2022 年) <https://easychair.org/smart-program/SocSys027/>
- 12) Hiroshi Deguchi, *Production Accounting & Realtime Economy (RTE)*, PAPAIOIS - ICES 2023 7th International

